

論文の内容の要旨

論文題目	強静電場中の水素原子の光イオン化
学位申請者	大古田駿

空間に一様な静電場中の原子の量子状態を理解する事は、量子力学誕生直後から現在に至るまで重要な問題として捉えられている。1970年代に、 $\sim \text{kV/cm}$ の弱い電場中の原子の光イオン化断面積の観測が行われた。そして、イオン化閾値近傍での光子エネルギー依存性に現れるピーク構造について、電場中の原子のシュタルクシフトした準位との対応がなされた。今世紀に入り、放出角度の情報を含んだ光電子の運動量分布の測定が行われるようになった。光電子運動量分布と原子の波動関数の存在確率密度との対応が議論され、原子の内部情報を抽出することが可能であることが示された。この実験手法は光イオン化顕微鏡と呼ばれ、原子構造を直接的に観測する新しい手法として注目されている。一方、近年のレーザー技術の発展により、原子内のクーロン相互作用に匹敵する $\sim \text{MV/cm}$ 電場成分を持つ高強度レーザーを作り出す事が容易となった。このような高強度レーザーを原子・分子に照射することによって、原子・分子との相互作用についての研究が多岐にわたって行われるようになった。高強度レーザーが作り出す強電場中では、原子の量子状態の歪みは、もはや摂動論によって扱うことはできず、物理的な描像も弱電場の場合と大きく異なる。負のエネルギー領域に強く閉じ込められた基底状態ですら強電場によって大きく歪められ、トンネル効果によるイオン化が起こる。また、ごく最近、正のエネルギーにおいて、静電場誘起状態 (Static-field-induced states, SFISs) と呼ばれる幅の広い共鳴状態が形成されることが理論的に示された。そこで、本研究では、 $\sim \text{MV/cm}$ の領域の強電場中での原子の状態間の遷移に着目し、最も基礎的である水素原子の光イオン化について新たな知見を得るべく理論的研究を行った。

本研究の目的は、強い静電場中の水素原子の光イオン化過程における観測量に SFISs に由来する構造を見出せることが可能かどうかを理論的に調べる事である。まず、基礎方程式である、時間に依存するシュレーディンガー方程式から出発し、光イオン化を1光子過程として捉えることにより、時間に依存しない非斉次のシュレーディンガー方程式を導出した。そして、イオン化の境界条件である

シーガート境界条件を課して、観測量である光イオン化レートと光電子の印可する強電場方向に対する垂直運動量分布とを定義した。これらに対して放物座標におけるグリーン関数を用いて定式化し、精度良く数値計算を実行するための計算手法を開発した。主量子数 $n=1, 2$ の初期状態について、直線または円偏光の 1 光子吸収による光イオン化過程に対して計算を行い、結果を分析した。

計算の結果、光イオン化レートと垂直運動量分布の入射光子エネルギー依存性に、SFISs がはっきりと区別できるピークとして現れることが見出された。観測量に現れたピークの幅は、SFISs の共鳴幅のみで決まるのではなく、初期状態と SFISs の幅の差、即ち、複素エネルギーの共鳴条件で決定されることを示した。この結果は、初期状態を無摂動のイオン化の起きない束縛状態として扱っている過去の研究では見られない新たな知見である。また、円偏光の場合においても適切な電場の強さでは観測量に鋭いピークが現れ、そのピークは SFISs のエネルギーと対応することを示した。円偏光でピークが現れることは、先行研究で解釈された放出電子の異なる経路間の干渉という物理機構では説明ができない、本研究で得られた新たな知見である。さらに、放物座標における非斉次シュレーディンガー方程式に現れる複素分離定数の分岐点に由来する構造がイオン化レートに現れるという非自明な現象を見出した。

以上のように、本論文では、強い静電場中の水素原子の光イオン化について、観測量を定義するとともに問題を定式化し、高精度の数値計算コードを開発した。いくつかの初期状態について、直線および円偏光の入射による光イオン化過程を理論的に調べた。適切な条件下では、SFISs という共鳴状態が光イオン化レートおよび垂直運動量分布に明確なピークとして現れることを示した。本研究で議論した領域の強静電場を実際に作って光イオン化の実験を行うことは困難である。しかし、高強度レーザーを利用することにより類似の実験を行い、SFISs を観測できることができるかもしれない。現在多くの高強度レーザーの実験で用いられる近赤外レーザーは、その時間周期が原子内電子の時間スケールに比べて十分に長いので、準静的な強電場として考えることができる。高強度近赤外レーザーを照射して原子の歪んだ状態を形成し、同時に極紫外領域の光を照射することによって生じる光電子を測定することで、本研究で議論された静電場中の原子の光イオン化レートと垂直運動量分布と類似の情報が得られる可能性がある。このような興味深い系について、本研究で得られた知見を踏まえた新しい理論の開発が期待される。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 大古田 駿

審査委員主査 森下 亨

委員 大淵 泰司

委員 斎藤 弘樹

委員 渡邊 信一

委員 菱川 明栄

博士論文審査の公聴会を平成31年1月24日に開催し、論文内容の発表を約60分、そして質疑応答を約30分行った。その後、審査を5名の審査委員全員の出席のもとで実施した。

本論文では、空間に一様な強電場中の水素原子の光イオン化に関する理論的研究が行われた。主量子数 $n=1$ と 2 の初期状態から、強電場中で正のエネルギー領域に現れる強電場誘起状態 (Static field induced states、SFISs) と呼ばれる共鳴状態への1光子遷移過程について詳細な分析が行われた。

本論文の第1章では、静電場中の原子の光イオン化について、弱電場における実験および理論の先行研究、そして、強電場における最近の研究を含めてこれまでの発展と本研究の位置づけが述べられている。続いて、本研究の目的、即ち、強い静電場中の光イオン化過程についての観測量における SFISs に由来する構造を分析すること、が提示されている。そして、以降の章についてのアウトラインがまとめられている。

第2章では、静電場中での水素原子の量子状態について述べられている。イオン化状態に対する適切な境界条件のもとでの時間に依存しないシュレーディンガー方程式の解であるシーガート状態について説明されている。続いて、負のエネルギー領域の量子状態である、トンネル状態 (Tunneling states、TSs) と SFISs についての解説が与えられている。そして、静電場中のシーガート状態の精度の高い計算手法の説明があり、水素原子の TSs と SFISs に対する複素固有エネルギーと固有関数についての計算結果が報告されている。

第3章では、強静電場中の水素原子の光イオン化について述べられている。入射光に対して双極子近似を用いた時間に依存するシュレーディンガー方程式から出発し、光イオン化を摂動によって取り扱うことで、非斉次の時間に依存しないシュレーディンガー方程式の導出がなされている。そして、観測量である光イオ

ン化レートと、静電場の方向に対する光電子の垂直方向の運動量分布が定義され、それらの計算手法が説明されている。そして、直線偏光および円偏光照射について、主量子数が $n=1$ と 2 の初期状態からのイオン化レートと垂直運動量分布の計算結果とそれらに対する詳細な分析が行われている。初期状態のTSと終状態のSFISの複素固有エネルギーに対する共鳴条件下でのイオン化の増大や、SFISの解の構築の際に現れる分離定数の複素エネルギー面での分岐に対応する構造等、非自明な現象を新たに見出したことが言及されている。

第4章では、結論が述べられるとともに、高強度レーザーを用いることにより、SFISsが実験的に観測される可能性が言及されている。

付録には、いくつかの数学的な関係が示されている。

以上のように、本論文では、強電場中の水素原子の光イオン化についての理論的研究が行われた。強電場中で正のエネルギー領域に現れるSFISsと呼ばれる共鳴状態への1光子遷移過程に着目して、基礎方程式から出発して問題を定式化した。イオン化レートと光電子の垂直運動量分布という観測量を定義し、それらを高精度計算する手法の開発がなされた。得られた結果について、複素エネルギーを持った状態についての非自明な現象を含めて詳細な分析がなされた。また、高強度レーザーを利用した、SFISsの実験的観測の可能性についての言及がなされた。

本論文で得られた知見は、原子・分子・光物理学、とくに、高強度レーザー場中の原子・分子ダイナミクスの研究において重要な役割を果たすものと考えられる。よって本論文は博士（理学）の学位請求論文として十分な価値を有するものと認める。